

Pemodelan dan Simulasi Gerakan Rotor Motor Stepper Jenis *Variable Reluctance* 3-Fasa Berbasis MATLAB/Simulink

Budhi Anto

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Riau

Kampus Binawidya, Jl. HR. Subrantas km. 12,5 Simpang Baru, Pekanbaru, Provinsi Riau

e-mail: budhianto.ur@gmail.com

Abstrak—Paparan ini menampilkan pemodelan dan simulasi gerakan bagian rotor dari motor stepper jenis *variable reluctance* 3-fasa berbasis MATLAB/Simulink untuk menjelaskan proses konversi elektromekanik yang terjadi pada motor stepper sewaktu kerja listrik diberikan kepadanya. Konstruksi motor stepper terdiri atas bagian stator yang mempunyai sepasang kutub menonjol tiap fasa dan bagian rotor yang mempunyai 8 gigi. Pada bagian stator terdapat belitan-belitan yang dililitkan pada kutub-kutub stator, sedangkan pada bagian rotor sama sekali tidak terdapat belitan. Proses simulasi dimulai dengan menurunkan model matematika gerakan rotor berdasarkan data-data konstruksi motor stepper dengan mempergunakan metode energi pada medan penggandeng. Persamaan gerak rotor tersebut kemudian disimulasikan menggunakan program MATLAB/Simulink. Simulasi yang dilakukan dengan memvariasikan frekuensi arus stator memperlihatkan bahwa untuk varian frekuensi arus stator, bagian rotor dari motor stepper bergerak langkah demi langkah dengan panjang langkah yang sama sebesar 15 derajat.

Kata Kunci: *motor stepper variable reluctance, metode energi pada medan penggandeng, MATLAB/Simulink..*

Abstract— *This paper presents MATLAB/Simulink based modelling and simulation of rotor motion of 3-phase variable reluctance stepper motor to show electromechanical conversion process inside the motor when electricity fed to the motor. Stator part of the motor has a pair of salient pole per phase and rotor part has 8 teeth. Stator windings are wound around stator salient poles, while rotor part has no windings. Simulation process is started by the work to derive rotor motion equation based on stepper motor construction data using energy in coupling field method, then the equation is simulated using MATLAB/Simulink program. Simulating by variation of stator current frequency shows rotor part of the stepper motor rotates in 15 degree steps for any variant of stator current frequency.*

Keywords: *variable reluctance stepper motor, energy in coupling field method, MATLAB/Simulink.*

I. PENDAHULUAN

Motor stepper adalah motor listrik yang mengubah pulsa-pulsa digital yang diberikan padanya menjadi gerak rotasi pada bagian rotornya. Sebuah pulsa digital yang diberikan pada belitan stator akan menyebabkan rotor bergerak sepanjang sudut tertentu. Krause menamakan sudut tersebut dengan *step length* [1], sedangkan Nasar menamakannya *step angle* [2]. Sebuah pulsa digital pada belitan stator menyebabkan rotor bergerak satu langkah yang panjangnya dinyatakan oleh nilai *step angle*. Untuk memenuhi satu putaran penuh (360 derajat), beberapa pulsa digital harus diberikan pada motor stepper. Dengan demikian motor stepper bergerak langkah demi langkah dengan panjang langkah yang sama.

Motor stepper banyak digunakan sebagai aktuator pada berbagai sistem pengaturan seperti pada *printer*, *disc drive*, *rotary actuator* dan mesin perkakas berbasis kontrol numerik. Berdasarkan prinsip kerjanya, Krause mengelompokkan motor stepper atas 2 jenis yaitu motor stepper jenis *variable reluctance* dan motor stepper jenis *permanent-magnet*. Perbedaan mendasar kedua jenis motor stepper tersebut terletak pada adanya magnet permanen

yang terpasang aksial pada poros rotor motor stepper jenis *permanent-magnet*. Disini hanya disimulasikan gerakan rotor motor stepper jenis *variable reluctance*.

II. LATAR BELAKANG

Penggunaan simulasi komputer pada kurikulum pendidikan teknik dewasa ini sudah meluas. Banyak buku teks yang menyajikan contoh-contoh dan latihan-latihan yang menggunakan program-program simulasi seperti MATLAB dan PSPICE. Bahkan situs www.mathworks.com telah mendaftar ratusan teks keteknikan yang menggunakan simulasi MATLAB [4]. Banyak juga literatur dibidang teknik elektro menampilkan simulasi komputer sebagai alat bantu pengajaran seperti pada [5-9]. Jurado et.al telah menggunakan simulasi komputer berbasis MATLAB-Simulink untuk pengajaran teknik kontrol [5]. Keminskyj et.al telah menggunakan program simulasinya untuk pengajaran matakuliah elektronika [6]. Baik Jurado maupun Keminskyj telah melaporkan bahwa penggunaan simulasi komputer telah membantu mahasiswa dalam pembelajarannya dan meningkatkan minat mahasiswa terhadap matakuliah yang diasuhnya.

Usaha-usaha yang dilakukan oleh banyak pengajar diatas telah mendorong kami untuk menggunakan simulasi komputer pada pengajaran mesin-mesin listrik. Disini simulasi komputer digunakan untuk menjelaskan prinsip kerja dari suatu mesin listrik dengan cara memperlihatkan dinamika bagian rotor dari mesin listrik tersebut sewaktu kerja listrik diberikan kepadanya. Usaha ini menjadi sangat penting, karena ia dapat menjembatani kesenjangan antara aspek teori elektromagnetik dari satu sisi dengan aspek praktis mesin-mesin listrik di sisi lain seperti yang selama ini terjadi.

III. KONSTRUKSI DAN PEMODELAN

Konstruksi motor stepper diperlihatkan pada Gambar 1a. Bagian stator motor stepper mempunyai sepasang kutub menonjol tiap fasanya, sehingga pada stator terdapat 6 kutub menonjol. Belitan-belitan stator dililitkan pada kutub-kutub menonjol. Pada bagian rotor terdapat 8 gigi, tidak terdapat belitan pada bagian ini. Sebagai pengenalan setiap gigi rotor diberi nomor 1 sampai 8. θ adalah besar sudut yang menyatakan posisi gigi 1 terhadap sumbu referensi (sumbu magnetik fasa a) sehingga θ dapat menggambarkan posisi rotor setiap waktu. ω adalah kecepatan sudut rotor. Gerakan yang berlawanan arah jarum jam ditandai dengan ω yang bernilai positif sedangkan gerakan rotor searah jarum jam ditunjukkan oleh ω bernilai negatif.

Diagram pengawatan belitan-belitan stator motor stepper diperlihatkan pada Gambar 1b. Arus yang mengalir ke belitan-belitan stator dikendalikan oleh saklar S1, S2 dan saklar S3.

Dari konstruksi pada Gambar 1a, kemudian diturunkan persamaan gerak rotor. Penyelesaian analitis terhadap persamaan gerak rotor merupakan persamaan yang menyatakan posisi rotor setiap waktu $\theta(t)$. Perilaku gerak rotasi rotor dipelajari dengan memplot persamaan posisi rotor tersebut sehingga diperoleh grafik posisi rotor terhadap waktu. Kecepatan gerak rotor setiap waktu $\omega(t)$ diperoleh dari turunan pertama terhadap $\theta(t)$.

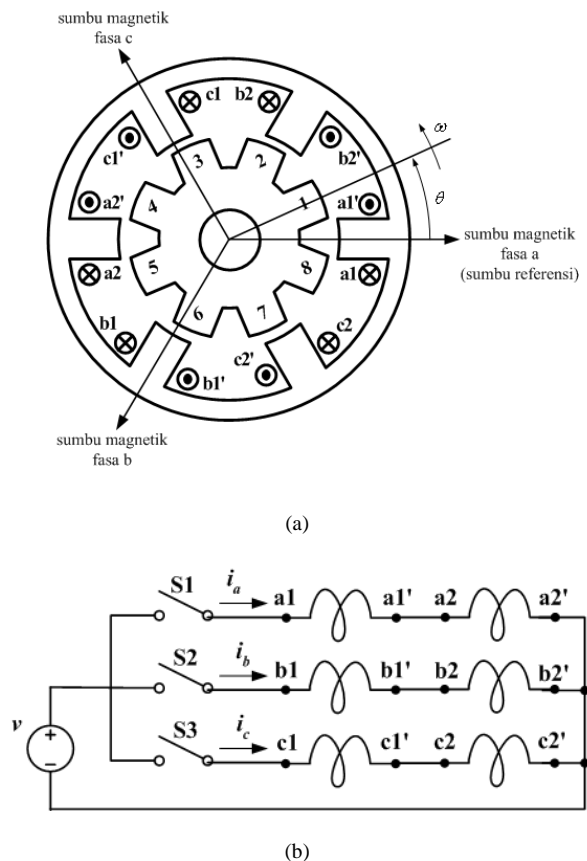
Grafik $\theta(t)$ dan $\omega(t)$ diperoleh dengan cara mensimulasikan persamaan gerak rotor secara langsung. Simulasi dilakukan dengan menggunakan program MATLAB/Simulink. Perilaku gerak bagian rotor dari motor stepper dipelajari berdasarkan bentuk $\theta(t)$ dan $\omega(t)$.

Persamaan gerak rotor diperoleh dengan mengambil beberapa asumsi sebagai berikut,

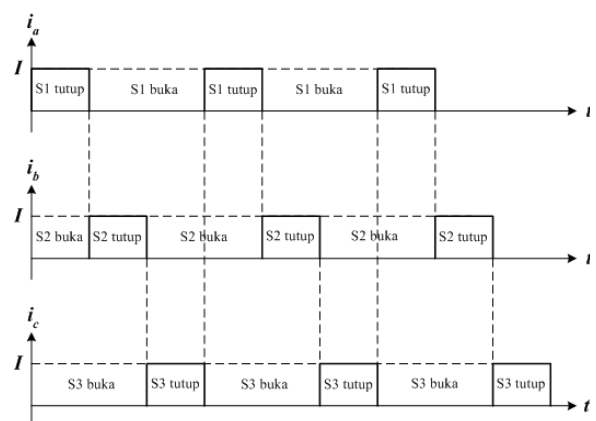
1. Fluksi magnet bocor yang terdapat pada masing-masing kutub stator diabaikan
2. Gandengan magnetik antar belitan fasa diabaikan
3. Motor stepper bekerja pada daerah linier dari karakteristik magnetik bahan stator dan rotor

Asumsi pertama dan kedua dapat diterima dengan syarat inti stator dan inti rotor terbuat dari bahan magnetik dengan permeabilitas tinggi dan arus pada masing-masing fasa (i_a , i_b dan i_c) diatur sedemikian rupa sehingga pada suatu waktu hanya terdapat 1 belitan fasa yang dialiri arus listrik. Diagram waktu arus masing-masing fasa diperlihatkan pada Gambar 2.

Rotor motor stepper bergerak langkah demi langkah dengan panjang langkah yang sama. Panjang langkah ditentukan oleh nilai step angle. Untuk motor stepper jenis variable reluctance, nilai step angle (SA) dihitung menggunakan persamaan berikut [2],



Gambar 1. (a) Motor stepper jenis variable reluctance dengan 6 kutub stator dan 8 gigi rotor, (b). diagram pengawatan belitan-belitan stator



Gambar 2. Diagram waktu arus stator motor stepper variable reluctance 3-fasa

$$SA = \frac{|G_s - G_r|}{G_s \cdot G_r} \times 360 \text{ derajat} \quad (1)$$

dengan G_s adalah jumlah kutub stator dan G_r adalah jumlah gigi rotor. Dengan demikian, berdasarkan konstruksi motor stepper dan persamaan (1) diatas, motor stepper mempunyai panjang langkah 15 derajat.

A. Sekilas Metode Energi Pada Medan Penggandeng

Metode energi yang tersimpan pada medan penggandeng (*energy in coupling field/ECF*) telah digunakan untuk

menganalisis dinamika konverter listrik-mekanik [1,3]. Objektif dari metode ECF adalah mendapatkan persamaan matematika torka elektromagnetik yang bekerja pada rotor mesin listrik. Kemudian Hukum Newton untuk gerak rotasi diterapkan untuk menjelaskan dinamika rotor mesin listrik tersebut.

Terdapat 2 (dua) jenis medan penggandeng yang digunakan pada proses konversi listrik-mekanik yaitu menggunakan penggandeng medan listrik dan yang kedua menggunakan penggandeng medan magnet. Motor stepper dan juga motor-motor listrik pada umumnya menggunakan penggandeng medan magnet.

Prinsip metode ECF adalah menurunkan persamaan *flux linkage* (λ) sebagai fungsi dari arus-arus pada kumparan-kumparan mesin (i) dan posisi/sudut rotor terhadap suatu sumbu referensi (θ), berdasarkan konstruksi mesin listriknya. Secara matematika dapat ditulis sebagai berikut,

$$\lambda = \lambda(i_1, i_2, i_3, \dots, i_k, \theta) \quad (2)$$

dengan k adalah jumlah kumparan yang terdapat pada mesin listrik. Kemudian persamaan energi yang tersimpan dalam medan magnet (W_f) diturunkan menggunakan persamaan berikut [1],

$$W_f = \int \sum_{k=1}^K i_k d\lambda_k ; \text{ dengan } d\theta = 0 \quad (3)$$

dengan K adalah jumlah kumparan yang terdapat pada mesin dan λ_k adalah flux linkage kumparan ke- k . Pada metode ECF telah diperkenalkan istilah *co-energy* (W_c) yang didefinisikan sebagai berikut [1],

$$W_c = \left(\sum_{k=1}^K i_k \lambda_k \right) - W_f \quad (4)$$

Torka elektromagnetik yang bekerja pada rotor (T_e) diperoleh menggunakan persamaan berikut,

$$T_e = \frac{\partial W_c(i_1, i_2, i_3, \dots, i_k, \theta)}{\partial \theta} \quad (5)$$

Persamaan dinamika rotor mesin listrik diperoleh dengan menerapkan Hukum Newton pada gerak rotasi sehingga diperoleh persamaan berikut,

$$T_e = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + B_m \frac{d\theta}{dt} + T_L \quad (6)$$

dengan T_L adalah torka beban mekanik rotor, J adalah konstanta inersia rotor dan beban mekanik dan B_m adalah konstanta redaman rotor.

Pada sistem elektromagnet linier, persamaan flux linkage dapat ditulis sebagai berikut [1],

$$[\lambda] = [L][i] \quad (7)$$

dan juga,

$$W_c = W_f \quad (8)$$

sehingga (4) dapat ditulis sebagai berikut,

$$T_e = \frac{\partial W_f(i_1, i_2, i_3, \dots, i_k, \theta)}{\partial \theta} \quad (9)$$

B. Persamaan Gerak Rotor Motor Stepper Variable Reluctance 3-Fasa

Berdasarkan Gambar 1b, persamaan tegangan belitan stator adalah sebagai berikut,

$$v = r_s i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} \quad (10)$$

$$v = r_s i_b + \frac{d\lambda_b}{dt} \quad (11)$$

$$v = r_s i_c + \frac{d\lambda_c}{dt} \quad (12)$$

Pada persamaan-persamaan diatas, r_s adalah resistansi belitan masing-masing fasa. λ_a , λ_b , dan λ_c masing-masing adalah flux linkage fasa **a**, fasa **b** dan fasa **c**. Persamaan flux linkage masing-masing fasa adalah sebagai berikut,

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (13)$$

L_{aa} , L_{bb} , dan L_{cc} masing-masing adalah induktansi diri masing-masing fasa. Induktansi-induktansi yang lain adalah induktansi yang muncul karena adanya gandengan magnetik antar fasa. Karena gandengan magnetik antar fasa diabaikan, persamaan (13) dapat direduksi menjadi persamaan berikut,

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & 0 & 0 \\ 0 & L_{bb} & 0 \\ 0 & 0 & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (14)$$

Persamaan induktansi diri masing-masing fasa diperoleh berdasarkan pengembangan terhadap persamaan induktansi diri mesin reluktans 1-fasa 2-kutub sebagaimana yang telah dilakukan oleh Krause[1]. Berdasarkan konstruksi motor stepper pada Gambar 1a, nilai induktansi diri masing-masing fasa adalah sebagai berikut,

$$L_{aa} = L_l + L_A + L_B \cos 8\theta \quad (15)$$

$$L_{bb} = L_l + L_A + L_B \cos 8(\theta + \frac{2}{3}\pi) \quad (16)$$

$$L_{cc} = L_l + L_A + L_B \cos 8(\theta - \frac{2}{3}\pi) \quad (17)$$

L_l adalah induktansi bocor belitan masing-masing fasa. L_A dan L_B adalah induktansi yang dihitung menggunakan persamaan-persamaan berikut [1],

$$L_A = \frac{L_m(\max) + L_m(\min)}{2} \quad (18)$$

$$L_B = \frac{L_m(\max) - L_m(\min)}{2} \quad (19)$$

dengan $L_m(\max)$ adalah nilai maksimum induktansi magnetisasi motor dan $L_m(\min)$ adalah nilai minimum induktansi magnetisasi motor. Induktansi magnetisasi motor bervariasi sesuai posisi gigi-gigi rotor terhadap kutub-kutub stator. Induktansi magnetisasi minimum terjadi jika posisi gigi rotor memberikan nilai reluktansi maksimum, sedangkan induktansi magnetisasi maksimum terjadi jika posisi gigi rotor memberikan nilai reluktansi minimum.

Jika L_l diabaikan maka persamaan (15), (16) dan persamaan (17) diatas dapat disederhanakan menjadi persamaan-persamaan berikut,

$$L_{aa} = L_A + L_B \cos 8\theta \quad (20)$$

$$L_{bb} = L_A + L_B \cos 8(\theta + \frac{2}{3}\pi) \quad (21)$$

$$L_{cc} = L_A + L_B \cos 8(\theta - \frac{2}{3}\pi) \quad (22)$$

Dari (14) dan (20), (21) serta (22) diperoleh,

$$\lambda_a = L_A i_a + L_B i_a \cos 8\theta \quad (23)$$

$$\lambda_b = L_A i_b + L_B i_b \cos 8(\theta + \frac{2}{3}\pi) \quad (24)$$

$$\lambda_c = L_A i_c + L_B i_c \cos 8(\theta - \frac{2}{3}\pi) \quad (25)$$

Diferensial flux linkage fasa **a** adalah,

$$d\lambda_a(i_a, \theta) = \frac{\partial \lambda_a}{\partial i_a} di_a + \frac{\partial \lambda_a}{\partial \theta} d\theta \quad (26)$$

Jika $d\theta=0$ diperoleh,

$$d\lambda_a(i_a, \theta) = \frac{\partial \lambda_a}{\partial i_a} di_a \quad (27)$$

Diferensial flux linkage fasa **b** dan fasa **c** jika $d\theta=0$ adalah sama dengan yang berlaku untuk fasa **a**, sehingga diperoleh,

$$d\lambda_b(i_b, \theta) = \frac{\partial \lambda_b}{\partial i_b} di_b \quad (28)$$

$$d\lambda_c(i_c, \theta) = \frac{\partial \lambda_c}{\partial i_c} di_c \quad (29)$$

Dengan menerapkan (27), (28) dan (29) pada (23), (24) dan (25), diperoleh persamaan-persamaan berikut,

$$d\lambda_a = (L_A + L_B \cos 8\theta) di_a \quad (30)$$

$$d\lambda_b = (L_A + L_B \cos 8(\theta + \frac{2}{3}\pi)) di_b \quad (31)$$

$$d\lambda_c = (L_A + L_B \cos 8(\theta - \frac{2}{3}\pi)) di_c \quad (32)$$

Selanjutnya dengan menggunakan (3) diperoleh,

$$W_f = \int (i_a d\lambda_a + i_b d\lambda_b + i_c d\lambda_c); \text{ dengan } d\theta = 0 \quad (33)$$

Dengan mensubstitusi (30), (31) dan (32) ke (33) diperoleh persamaan berikut,

$$W_f = \frac{1}{2} (L_A + L_B \cos 8\theta) i_a^2 + \frac{1}{2} (L_A + L_B \cos 8(\theta + \frac{2}{3}\pi)) i_b^2 + \frac{1}{2} (L_A + L_B \cos 8(\theta - \frac{2}{3}\pi)) i_c^2 \quad (34)$$

Persamaan torka elektromagnetik yang bekerja pada rotor diperoleh dengan menerapkan (9) pada (34) sehingga diperoleh persamaan berikut,

$$T_e = -4L_B \{ i_a^2 \sin 8\theta + i_b^2 \sin 8(\theta + \frac{2}{3}\pi) + i_c^2 \sin 8(\theta - \frac{2}{3}\pi) \} \quad (35)$$

Selanjutnya dengan mensubstitusi (35) ke (6) diperoleh persamaan berikut,

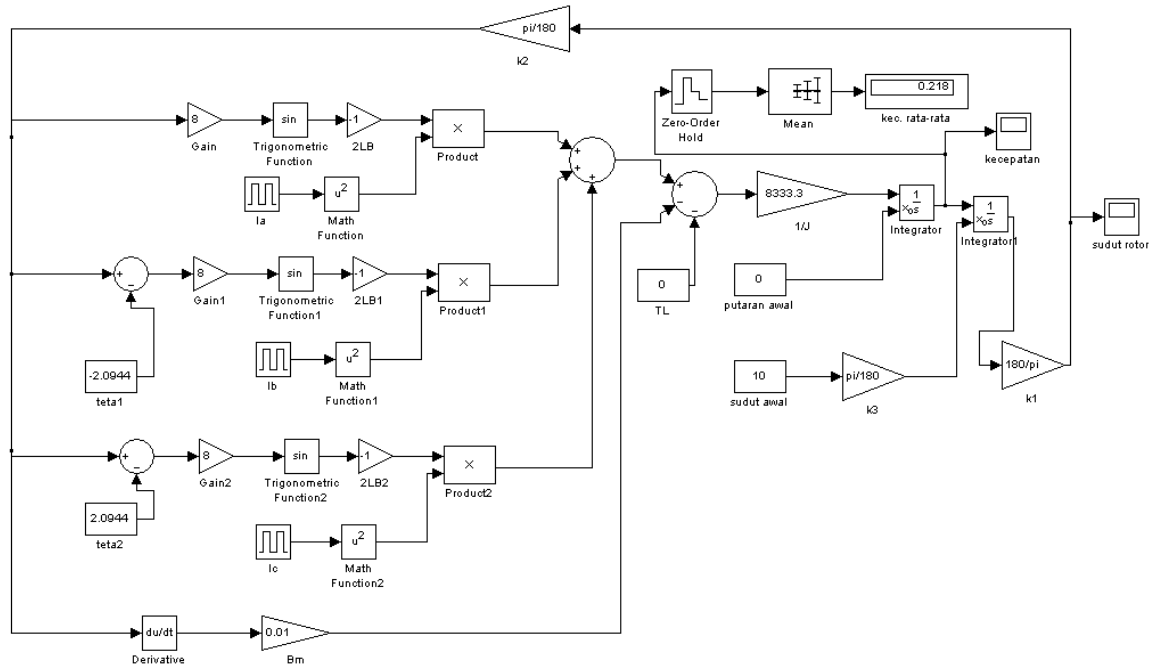
$$J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + B_m \frac{d\theta}{dt} + T_L = -4L_B \{ i_a^2 \sin 8\theta + i_b^2 \sin 8(\theta + \frac{2}{3}\pi) + i_c^2 \sin 8(\theta - \frac{2}{3}\pi) \} \quad (36)$$

Persamaan (36) diatas menyatakan posisi rotor (θ) setiap waktu, karena itu persamaan (36) dinamakan persamaan gerak rotor.

Persamaan (36) merupakan persamaan diferensial orde dua tak-linier. Solusi terhadap persamaan tersebut adalah fungsi yang menyatakan posisi rotor setiap waktu $\theta(t)$. Grafik $\theta(t)$ diperoleh dengan mensimulasikan persamaan (35) menggunakan program MATLAB/Simulink.

IV. METODE SIMULASI

Seperti telah dijelaskan pada bagian sebelumnya, persamaan (36) diturunkan dengan mengambil asumsi bahwa motor stepper dioperasikan pada daerah linier dari karakteristik magnetik bahan inti mesin. Gerakan rotor disimulasikan dengan cara menyelesaikan persamaan (36) untuk memperoleh grafik $\theta(t)$. MATLAB/Simulink



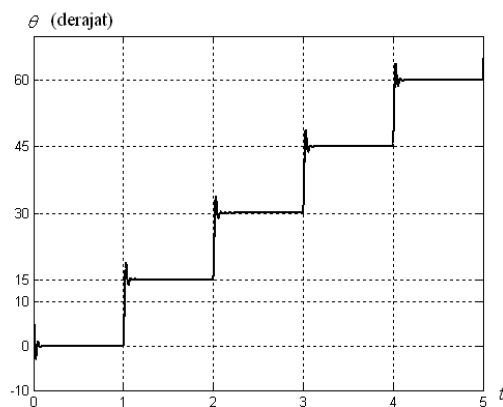
Gambar 3. Model MATLAB/Simulink persamaan gerak rotor motor stepper variable reluctance 3-fasa

digunakan untuk mendapatkan grafik $\theta(t)$ tersebut. Grafik kecepatan sudut rotor $\omega(t)$, diperoleh dari turunan pertama terhadap $\theta(t)$. Persamaan (1) digunakan sebagai acuan dalam mengevaluasi gerakan rotor. Berdasarkan (1), bagian rotor dari motor stepper akan bergerak langkah demi langkah dengan panjang langkah yang sama sebesar 15 derajat.

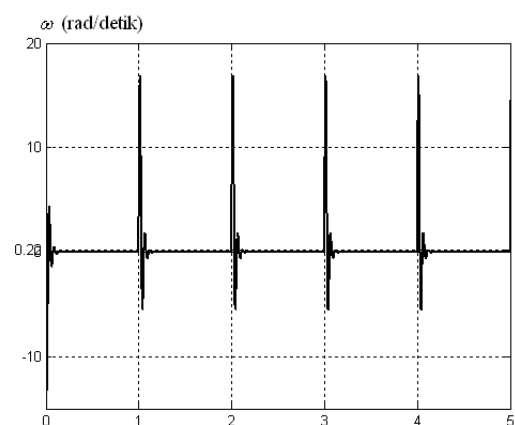
Model MATLAB/Simulink terhadap persamaan (36) diperlihatkan pada Gambar 3. Data-data motor stepper variable reluctance 3-fasa adalah sebagai berikut, T_e (maksimum) = 0,25 N.m; $L_B = 0,25$ H; $J = 0,00012$ kg.m²; $B_m = 0,01$ N.m.s; $I = 0,5$ A; $T_L = 0,0$ N.m (beban nol). Persamaan differensial diselesaikan menggunakan solver ode45 (Dormand-Prince).

V. HASIL DAN PEMBAHASAN

Beberapa hasil simulasi diperlihatkan pada Gambar 4, 5, 6, 7, 8, 9 dan Gambar 10. Pada Gambar 4, frekuensi pulsa arus masing-masing fasa adalah 0,333 Hz dengan duty cycle 0,333, yang berarti arus hanya mengalir pada belitan masing-masing fasa selama 1 detik dengan periode 3 detik. Urutan penyalan adalah fasa **a**, fasa **b** dan fasa **c**. Mula-mula rotor pada posisi 10 derajat, setelah 1 detik sudut rotor menjadi 0 derajat. Hal ini disebabkan saklar S1 pada posisi tutup selama 1 detik sehingga arus listrik mengalir pada belitan fasa **a**, saklar S2 dan saklar S3 pada posisi buka sehingga tidak ada arus pada belitan fasa **b** dan belitan fasa **c**, sehingga gigi 1 dan gigi 5 rotor berhadapan dengan kedua kutub fasa **a**. Selang 1 detik kemudian, sudut rotor menjadi 15 derajat. Hal ini disebabkan arus listrik hanya mengalir pada belitan fasa **b**



Gambar 4. Perubahan sudut rotor pada frekuensi arus stator 0,333 Hz dengan duty cycle 0,333; sudut awal 10 derajat; urutan penyalan fasa a, fasa b dan fasa c.



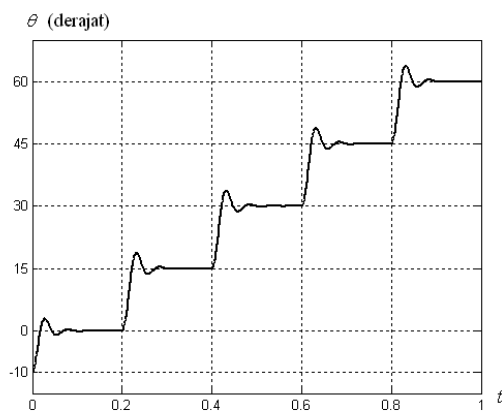
Gambar 5. Kecepatan sudut rotor pada frekuensi arus stator 0,333 Hz dengan duty cycle 0,333

(S1 dan S3 posisi buka, S2 posisi tutup), sehingga gigi 2 dan gigi 6 rotor berhadapan dengan kedua kutub fasa **b**. Selang 1 detik kemudian, sudut rotor menjadi 30 derajat, karena arus listrik hanya mengalir pada belitan fasa **c** (S1 dan S2 posisi buka, S3 posisi tutup), sehingga gigi 3 dan gigi 7 rotor berhadapan dengan kutub-kutub fasa **c**. Selang 1 detik kemudian, sudut rotor menjadi 45 derajat, karena arus listrik hanya mengalir pada belitan fasa **a** (S1 tutup, S2 dan S3 buka), sehingga gigi 4 dan gigi 8 rotor berhadapan dengan kutub-kutub fasa **a**. Dan seterusnya. Hasil simulasi pada Gambar 4 memperlihatkan bahwa rotor bergerak langkah demi langkah dengan panjang langkah yang sama sebesar 15 derajat. Panjang 1 langkah ditempuh dalam waktu 1 detik.

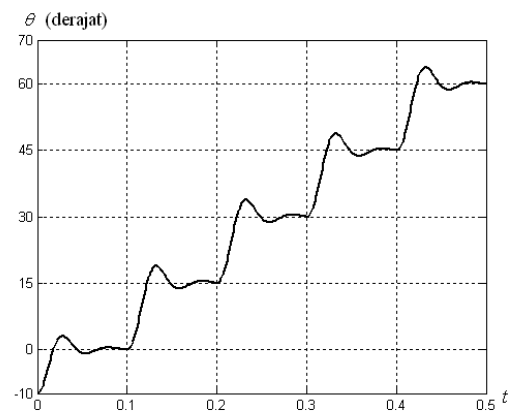
Gambar 5 memperlihatkan profil kecepatan sudut rotor pada frekuensi pulsa arus stator 0,333 Hz dan sudut awal rotor 10 derajat. Pada 1 detik pertama, mula-mula rotor diam (kecepatan sudut sama dengan nol), kemudian kecepatannya naik hingga mencapai nilai maksimum dan kemudian menurun hingga akhirnya rotor berhenti pada posisi sudut rotor 0 derajat. Kecepatan sudut rotor pada 1 detik pertama bernilai negatif, menunjukkan bahwa rotor bergerak searah jarum jam. Setelah 1 detik pertama, rotor bergerak kembali dari posisi 0 derajat dan berhenti pada posisi 15 derajat. Selama 1 detik kedua ini, kecepatan sudut rotor bernilai positif, menunjukkan bahwa rotor bergerak

berlawanan arah jarum jam. Setelah 1 detik kedua, rotor bergerak kembali dari posisi 15 derajat dan berhenti pada posisi 30 derajat. Kecepatan sudut rotor bernilai positif, menunjukkan bahwa rotor bergerak berlawanan arah jarum jam. Untuk 1 detik selanjutnya, kecepatan sudut rotor bernilai positif, sehingga dengan demikian rotor bergerak berlawanan arah jarum jam. Kecepatan sudut rata-rata adalah 0,22 rad/detik (2,08 rpm).

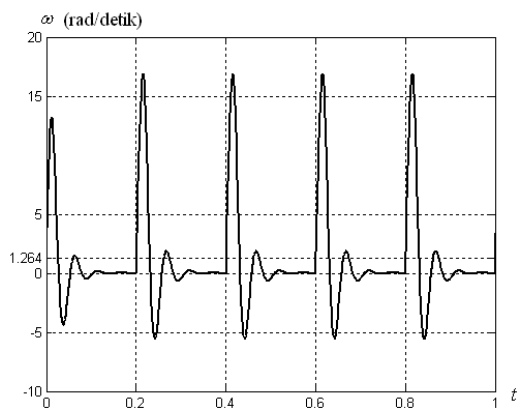
Gambar 6 memperlihatkan perubahan posisi rotor pada frekuensi pulsa arus stator 1,67 Hz dengan duty cycle 0,333 dengan urutan penyalan adalah fasa **a**, fasa **b** dan fasa **c**. Posisi awal rotor adalah -10 derajat. Pada 0,2 detik pertama, belitan fasa **a** di-energize sehingga rotor bergerak dari posisi -10 derajat dan berhenti pada posisi 0 derajat, 0,2 detik kemudian, belitan fasa **b** di-energize sehingga rotor bergerak dari sudut 0 derajat dan berhenti pada sudut 15 derajat. Kemudian belitan fasa **c** di-energize selama 0,2 detik sehingga rotor bergerak dari sudut 15 derajat dan berhenti pada sudut 30 derajat. Kemudian belitan fasa **a** kembali di-energize selama 0,2 detik sehingga rotor bergerak dari sudut 30 derajat dan berhenti pada sudut 45 derajat. Dan seterusnya. Hasil simulasi pada Gambar 6 memperlihatkan bahwa rotor bergerak langkah demi langkah dengan panjang langkah yang sama sebesar 15 derajat. Panjang 1 langkah ditempuh dalam waktu 0,2 detik.



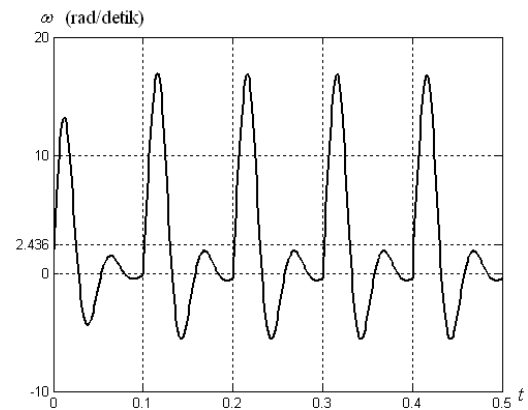
Gambar 6. Perubahan sudut rotor pada frekuensi arus stator 1,67 Hz dengan duty cycle 0,333; sudut awal rotor -10 derajat; urutan penyalan fasa a, fasa b dan fasa c.



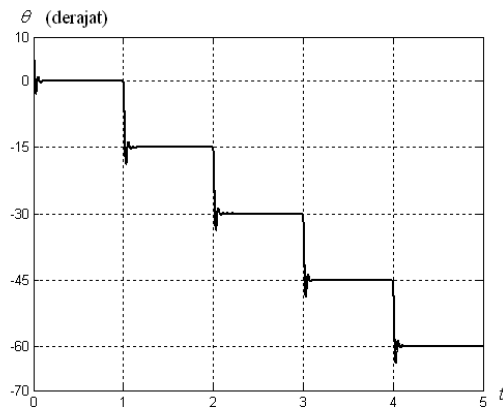
Gambar 8. Perubahan sudut rotor pada frekuensi arus stator 3,33 Hz dengan duty cycle 0,333; sudut awal rotor -10 derajat; urutan penyalan fasa a, fasa b dan fasa c.



Gambar 7. Kecepatan sudut rotor pada frekuensi arus stator 1,67 Hz dengan duty cycle 0,333



Gambar 9. Kecepatan sudut rotor pada frekuensi arus stator 3,33 Hz dengan duty cycle 0,333



Gambar 10. Perubahan sudut rotor pada frekuensi arus stator 0,333 Hz dengan duty cycle 0,333; sudut awal 10 derajat; urutan penyalan fasa a, fasa c dan fasa b.

Gambar 7 memperlihatkan profil kecepatan sudut rotor pada frekuensi pulsa arus stator 1,67 Hz dan sudut awal rotor -10 derajat. Pada 0,2 detik pertama, mula-mula rotor diam (kecepatan sudut sama dengan nol), kemudian kecepatannya naik hingga mencapai nilai maksimum dan kemudian menurun hingga akhirnya rotor berhenti pada posisi sudut rotor 0 derajat. Kecepatan sudut rotor pada 0,2 detik pertama bernilai positif, menunjukkan bahwa rotor bergerak berlawanan arah jarum jam. Setelah 0,2 detik pertama, rotor bergerak kembali dari posisi 0 derajat dan berhenti pada posisi 15 derajat. Selama 0,2 detik kedua ini, kecepatan sudut rotor bernilai positif, menunjukkan bahwa rotor bergerak berlawanan arah jarum jam. Setelah 0,2 detik kedua, rotor bergerak kembali dari posisi 15 derajat dan berhenti pada posisi 30 derajat. Kecepatan sudut rotor bernilai positif, menunjukkan bahwa rotor bergerak berlawanan arah jarum jam. Untuk 0,2 detik selanjutnya, kecepatan sudut rotor bernilai positif, sehingga dengan demikian rotor bergerak berlawanan arah jarum jam. Kecepatan sudut rata-rata adalah 1,26 rad/detik (12,07 rpm).

Gambar 8 memperlihatkan perubahan posisi rotor pada frekuensi pulsa arus stator 3,33 Hz dengan duty cycle 0,333 dengan urutan penyalan adalah fasa **a**, fasa **b** dan fasa **c**. Posisi awal rotor adalah -10 derajat. Pada 0,1 detik pertama, belitan fasa **a** di-energize sehingga rotor bergerak dari posisi -10 derajat dan berhenti pada posisi 0 derajat, 0,1 detik kemudian, belitan fasa **b** di-energize sehingga rotor bergerak dari sudut 0 derajat dan berhenti pada sudut 15 derajat. Kemudian belitan fasa **c** di-energize selama 0,1 detik sehingga rotor bergerak dari sudut 15 derajat dan berhenti pada sudut 30 derajat. Kemudian belitan fasa **a** kembali di-energize selama 0,1 detik sehingga rotor bergerak dari sudut 30 derajat dan berhenti pada sudut 45 derajat. Dan seterusnya. Hasil simulasi pada Gambar 8 memperlihatkan bahwa rotor bergerak langkah demi langkah dengan panjang langkah yang sama sebesar 15 derajat. Panjang 1 langkah ditempuh dalam waktu 0,1 detik.

Gambar 9 memperlihatkan profil kecepatan sudut rotor pada frekuensi pulsa arus stator 3,33 Hz dan sudut awal rotor -10 derajat. Pada 0,1 detik pertama, mula-mula rotor diam (kecepatan sudut sama dengan nol), kemudian kecepatannya naik hingga mencapai nilai maksimum dan kemudian menurun hingga akhirnya rotor berhenti pada posisi sudut rotor 0 derajat. Kecepatan sudut rotor pada 0,1

detik pertama bernilai positif, menunjukkan bahwa rotor bergerak berlawanan arah jarum jam. Setelah 0,1 detik pertama, rotor bergerak kembali dari posisi 0 derajat dan berhenti pada posisi 15 derajat. Selama 0,1 detik kedua ini, kecepatan sudut rotor bernilai positif, menunjukkan bahwa rotor bergerak berlawanan arah jarum jam. Setelah 0,1 detik kedua, rotor bergerak kembali dari posisi 15 derajat dan berhenti pada posisi 30 derajat. Kecepatan sudut rotor bernilai positif, menunjukkan bahwa rotor bergerak berlawanan arah jarum jam. Untuk 0,1 detik selanjutnya, kecepatan sudut rotor bernilai positif, sehingga dengan demikian rotor bergerak berlawanan arah jarum jam. Kecepatan sudut rata-rata adalah 2,44 rad/detik (23,26 rpm).

Gambar 10 memperlihatkan perubahan posisi rotor pada frekuensi pulsa arus stator 0,333 Hz dengan duty cycle 0,333 dengan urutan penyalan adalah fasa **a**, fasa **c** dan fasa **b**. Posisi awal rotor adalah 10 derajat. Pada 1 detik pertama, belitan fasa **a** di-energize sehingga gigi 1 dan gigi 5 rotor akan berhadapan-hadapan dengan kutub-kutub fasa **a** atau rotor bergerak dari posisi 10 derajat lalu berhenti pada posisi 0 derajat. Selama 1 detik kemudian, belitan fasa **c** di-energize sehingga gigi 4 dan gigi 8 rotor berhadapan-hadapan dengan kutub-kutub fasa **c** atau rotor bergerak dari sudut 0 derajat lalu berhenti pada sudut -15 derajat. Kemudian belitan fasa **b** di-energize selama 1 detik sehingga gigi 3 dan gigi 7 rotor akan berhadapan-hadapan dengan kedua kutub fasa **b** atau rotor bergerak dari sudut -15 derajat lalu berhenti pada sudut -30 derajat. Kemudian belitan fasa **a** kembali di-energize selama 1 detik sehingga gigi 2 dan gigi 6 rotor akan berhadapan-hadapan dengan kedua kutub fasa **a** atau rotor bergerak dari sudut -30 derajat lalu berhenti pada sudut -45 derajat. Dan seterusnya. Dengan membandingkan hasil simulasi pada Gambar 4 dan hasil simulasi pada Gambar 10 terlihat bahwa telah terjadi pembalikan arah gerakan rotor ketika urutan penyalan belitan-belitan fasa diubah dari urutan **a-b-c** ke urutan **a-c-b**. Dengan urutan penyalan fasa **a** – fasa **b** – fasa **c**, rotor akan bergerak berlawanan arah jarum jam, jika urutan penyalan diubah menjadi fasa **a** – fasa **c** – fasa **b**, rotor akan bergerak searah jarum jam. Namun demikian pengubahan urutan penyalan belitan-belitan fasa tersebut tidak mengubah panjang langkah rotor yaitu sebesar 15 derajat.

VI. KESIMPULAN

Pemodelan dan simulasi gerakan rotor motor stepper jenis variable reluctance 3-fasa telah dilakukan. Simulasi yang dilakukan dengan memvariasikan frekuensi arus stator memperlihatkan hasil bahwa untuk setiap varian frekuensi arus stator, bagian rotor telah bergerak langkah demi langkah dengan panjang langkah yang sama sebesar 15 derajat. Kecepatan rata-rata rotor dipengaruhi oleh frekuensi arus stator. Makin besar frekuensi arus stator, kecepatan rata-rata rotor makin besar. Arah gerakan rotor dapat diubah dengan cara mengubah urutan penyalan belitan-belitan stator. Dengan urutan penyalan fasa **a** – fasa **b** – fasa **c**, rotor akan bergerak berlawanan arah jarum jam. Dengan urutan penyalan fasa **a** – fasa **c** – fasa **b**, rotor akan bergerak searah jarum jam.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Krause and Wasynczuk, *Electromechanical Motion Devices*, McGraw-Hill, pp.1-41& pp.331-349, 1989.
- [2] Nasar, *Handbook of Electric Machines*, McGraw-Hill, pp.11.1-11.29, 1987.
- [3] Krause, *Analysis of Electric Machinery*, McGraw-Hill, pp.1-66, 1987.

- [4] Dabney and Ghorbel, *Enhancing an Advanced Engineering Mechanics Course Using MATLAB and Simulink*, International Journal of Engineering Education, Vol. 21, No. 5, pp.885-895, 2005.
- [5] Jurado, et.al, *Experience with Neural Networks and Fuzzy Logic in An Electrical Engineering Control Course*, Proceedings of the 31st Frontiers in Education Conference, 2001.
- [6] Kaminskyi, *Mechanistic Simulation in Electronics Engineering Education*, International Journal on Engineering Education, Vol.15, No.5, pp.365-371, 1999.
- [7] Vournas, et al, *An Educational Simulation Tool for Power System Control and Stability*, IEEE Transactions on Power Systems, Vol.19, No.1, pp.48-55, 2004.
- [8] Pires and Silva, *Teaching Nonlinear Modelling, Simulation, and Control of Electronic Power Converters Using MATLAB/Simulink*, IEEE Transaction on Education, Vol. 45, No.3, pp. 253-261, 2002
- [9] Yaz and Azemi, *Utilizing MATLAB in Two Graduate Electrical Engineering Courses*, Proceedings of the 25th Frontiers in Education Conference, 1995.